



TITLE:

# <高校生のページ>固体照明が拓く 明るい世界

AUTHOR(S):

川上, 養一; 船戸, 充

---

CITATION:

川上, 養一 ...[et al]. <高校生のページ>固体照明が拓く 明るい世界. Cue  
2010, 24: 52-57

ISSUE DATE:

2010-09

URL:

<https://doi.org/10.14989/145907>

RIGHT:

## 高校生のページ

# 固体照明が拓く明るい世界

工学研究科 電子工学専攻 量子機能工学講座 光材料物性工学分野  
川 上 養 一, 船 戸 充

## はじめに

19世紀末期のエジソンによる電灯の事業化 [1] 以来, わたしたちは, 電気による照明の中で生活をしています. NASA のホームページには, 夜の地球の衛星写真が掲載されています [2]. それを見ると, 照明によって, 夜が, いかに明るく照らされているのかを実感することができます.

さて, この照明ですが, あまりに身近にあり, しかもエアコンなど他の家電製品よりも電気を使わないように見えるため, その消費電力にまでなかなか思いが至らないのではないのでしょうか. 実は, 人類が製造する全電力のうち約 20% が, 照明によって消費されています. しかも, 蛍光灯の発光の効率は約 30% (つまり, 70% は熱や赤外線・紫外線として浪費されている), 白熱ランプのそれは約 5% であることから, 最も楽観的な見積もりとして, すべての照明を蛍光灯が担っていると仮定しても [3], 全電力のうち  $20\% \times 70\% = 14\%$  は, 熱や赤外線・紫外線になって捨てられていることを意味しています. 省エネが全世界的な課題である現在, この浪費されている電力を極力小さくすることが重要であり, 実際に, 大手家電メーカは, 効率の悪い白熱ランプの製造を中止しつつあります.

白熱ランプやさらには蛍光灯に代わる新しい照明光源として最近注目を集めているのが, 窒化物半導体 InGaN を用いた白色発光ダイオード (LED) です. 白熱ランプや蛍光灯が, いわゆる真空管を用いているのに対して, LED は固体である半導体を利用していることが特徴のひとつで, 固体照明とも呼ばれます. 白色 LED は小型, 堅牢, 長寿命, 高効率といった特長を持っています. さらに, 構成する元素は無害なものばかりですので, 水銀を使う蛍光灯と異なり, 環境負荷も小さくすることができます.

このような背景から, 最近, ランプ型の白色 LED 電球が市販されました. また, 携帯電話やパソコン, さらにテレビの液晶画面のバックライトなど生活のさまざまな場面に浸透してきていますし, 今後もその傾向は強まると予測されています. 図 1 は, 白色 LED を含め, さまざまな発光色の LED の発光効率 [4] が, 年々いかに改善されてきたのかを示す図です. 蛍光灯の発光効率は, おおよそ 100 lm/W ですが, 白色 LED のそれは, 市販レベルで同程度, 研究室レベルでは, すでに 250 lm/W に達しようとしています.

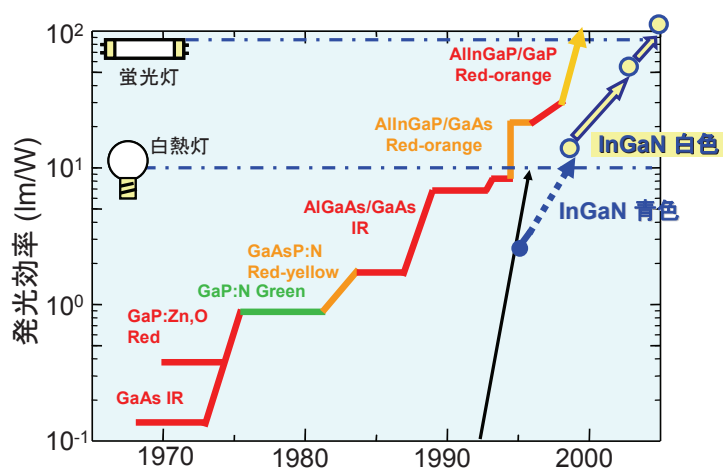


図 1 さまざまな LED の発光効率の年次変化.

この白色 LED の問題点を指摘する前に, 私たちがいかに物体の色を認識しているのかという話をしたいと思います. 図 2 は, 同一のりんごをさまざまな照明光源下で撮影したものです. (b) の太陽光での発色が基準だとすると, (a) の蛍光灯ではやや黒ずんで見え, (c) の白熱ランプが混じると明るい赤

が強調されていることがわかります。このように、物体色が異なって見えるのは、光源に含まれる発光成分が異なるからです。例えば、よく知られているように、太陽光は、あらゆる可視光を含んだ光で、それらの加色混和の結果、白色に見えています。それに対して蛍光灯は、主として、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) 色の発光成分を持っており、

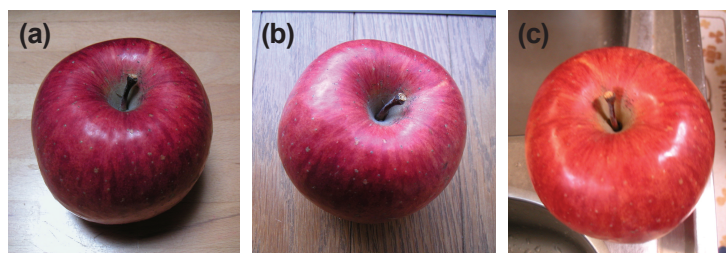


図2 異なる照明下で撮影した同一のりんご。(a) 蛍光灯、(b) 太陽光、(c) 太陽光+白熱ランプ。

それら RGB の加色混和によって擬似的な白色を出しています。私たちは、それらの照明光が物体にあたって反射した光を物体の色として認識するわけですが、光源がもともと含んでいる発光成分が違うので、それが、図2のような物体色の違いとなって現れます。

このことは、逆に、光源の発光成分を調整してやれば、物体を所望の色に見せることができることを意味しています。例えば、日常生活における部屋の照明としては人間の肌の色が自然に（できれば健康的に）見える光源が望ましく、展示の照明としては（青々した野菜など）展示物の特性がよく現れる光源が望ましく、外科医療用照明としては臓器などの正常部位と腫瘍などの異常部位をより明確に区別できる光源が望ましいと考えられます。つまり、究極の光源とは、「所望の物体色を強調するための発光成分の調整ができ、かつ効率 100% の光源」であり、私たちはそのような光源のことを「テイラーメイド光源」と呼んでいます。

白色 LED の話に戻しましょう。この LED は、窒化物半導体 InGaN による青色 LED とそれによって励起される黄色 YAG 蛍光体で構成され、補色の関係にある青と黄色の加色混和により擬似白色を出力しています。ですので、緑や赤色成分が原理的に弱く、開発当初は、物体色は不自然になりやすいという問題を抱えていました。蛍光体の開発の結果、その問題点は解決されつつありますが、物体色を自然に見せようとするとう発光効率が低くなり、逆に、高発光効率化を目指すとう物体色が不自然になるというトレードオフの関係があり、それらを両立させることはいまだ困難です。これは、蛍光灯でも同じことが言えます。私たちは、究極のテイラーメイド光源の実現を目指し、光材料開発から基礎物性評価、さらには、新たな応用分野の開拓も行っています。取り組みの一例として、窒化物半導体を用いたナノメータ (10<sup>9</sup>m) レベルで制御された構造の作製とその評価を以下で紹介します。

### 窒化物半導体を用いた新しい LED の開発

まず、窒化物半導体の結晶構造を図3に示します。窒化物半導体は、六方晶系のウルツ鉱構造をとります。従来は、図3(a)に示す(0001)面が主に用いられてきましたが、この他にも、図3(b)に示した(11 $\bar{2}$ 2)面に代表される半極性面や、図3(c)に示した(1 $\bar{1}$ 00)と(11 $\bar{2}$ 0)面に代表される無極性面を定義することができます。これらの面は、(0001)面とのなす角 $\theta$ で分類され、半極性面は $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 、無極性面は $\theta = 90^\circ$ を満たします。私たちのLEDでは、これらさまざまな結晶面が活躍します。

図4(a)に、既存の白色LEDの概略図を示しました。一般的には、サファイアの(0001)面という結晶面を基板とし、その上に、有機金属気相成長法と呼ばれる結晶成長法により、n型の窒化ガリウム(GaN)、InGaN発光層、p型GaNの単結晶を順次積層します。GaNはpn接合ダイオードを形成し、実際に発光するのは、それらに挟まれたInGaN層だけです。InGaN発光層の膜厚は3nmが標準で、量子効果が発現するほど薄いため量子井戸と呼ばれます。発光強度を増強するため、それを何層か繰り返し積層することもあります。InGaNにおけるInとGaの構成比やInGaN層の膜厚を適当に調整することにより、発光色を原理的には370から2,000nm程度まで変化させることができます。(ちなみに、可

視光は380から780 nmです。) 白色LEDでは、発光波長は約450 nmの青色LEDが利用され、それと黄色に発光する蛍光体を組み合わせることにより擬似白色を得ていますが、上述のように、物

体色の制御と効率の両立に関して問題を残しています。この問題の要因は、蛍光体において青色LEDの光を吸収し黄色を発するという色変換が行われているため、その際にエネルギー損（ストークス損）が発生することにあります。ストークス損は蛍光体を使う以上不可避であり、効率100%を原理的に不可能にしています。しかも、蛍光体の発光は、多くの波長成分を含むため、微妙な発光色の制御が困難です。テイヤーマイド光源の実現には、さらなるブレークスルーが必要とされています。

この命題に対して、私たちは、蛍光体を使わず、窒化物半導体だけから任意の発光色を得ることを目的とし、図4 (b) に示したような構造をした白色・多色LEDを提案しています。従来構造[図4 (a)]との大きな違いは、私たちのLEDが三次元的な構造をしていることです。このようなGaN微細構造は、有機金属気相成長法により、次のように作製します。まず、サファイア(0001)面基板上に数 $\mu\text{m}$ のn型GaNを形成します。いったん反応炉から取り出してシリコン酸化膜( $\text{SiO}_2$ )を別の装置で堆積した後、それを、フォトリソグラフィによって、ストライプ状に加工します。ストライプは、ある特定の結晶方位に向けておきます(図4 (b) の場合、 $[1\bar{1}00]$  方向)。再度、有機金属気相成長装置に導入し、適当な成長条件のもとでGaNの結晶成長を行うと、GaNは $\text{SiO}_2$ 上に堆積しない特性を持っているため、(0001) および  $\{11\bar{2}2\}$  ファセット結晶面で構成された微細構造を得ることができます。最後に、その微細構造上にInGaN量子井戸発光層とp型GaN層を結晶成長しLED構造とします。複数のファセット面を利用するためマルチファセットLEDと呼んでいます。(断面がかまぼこ状なので、「ナノかまぼこ」と呼ぶ人もいます。) InGaN量子井戸発光層の結晶成長条件は、平坦な(0001)面上に形成したときに膜厚2-4 nm, In組成20-25%となるように設定していますが、それらはファセット面方位や構造に強く依存し、通常、(0001) ファセット上では設計に比べて膜厚、In組成とも大きくなる傾向にあり、 $\{11\bar{2}2\}$  ファセット上では逆の傾向となります。その結果、発光色はファセット面方位に依存するようになります。つまり、このマルチファセットLEDでは、さまざまな発光色を持ったLEDが電氣的に並列に接続されていることになり、それにより、白色・多色発光が実現されるわけです。しかも、ファセット構造は $\text{SiO}_2$ マスクの構造に依存することから、発光色の制御性を高めるために図4 (b) に例示したようにAおよびBのよう

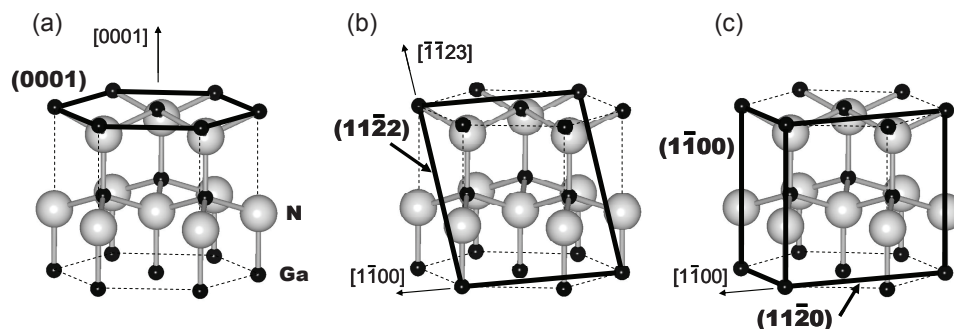
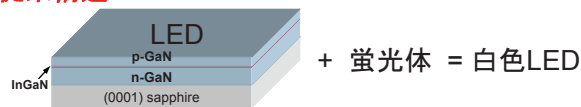


図3 窒化物半導体の結晶構造である六方晶ウルツ鉱構造の概略図。(a)では(0001)面、(b)では $(11\bar{2}2)$ 面、(c)では $(1\bar{1}00)$ と $(11\bar{2}0)$ 面を太線で示した。

(a) 従来構造



(b) 新構造

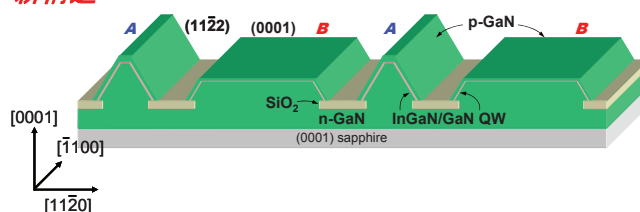


図4 (a) 既存の白色LEDの基本構造。InGaNを発光層とする青色LEDと黄色の蛍光体を組み合わせている。(b) 私たちが提案している微細構造を用いた白色・多色LED。



異なる微細構造を一つの LED チップの中に適当な比で混在させてみました。これにより、結晶の成長条件に加えて、この構造の混在比によっても発光色が制御できるようになると期待されます。本研究では、構造 *A* のための SiO<sub>2</sub> マスク開口幅は 5  $\mu\text{m}$ , *B* のためのそれは 15  $\mu\text{m}$ , マスク幅はいずれについても 5  $\mu\text{m}$  としました。

まず、蛍光体フリーのマルチファセット白色 LED を紹介しましょう。図 5 に、(a) LED の発光スペクトルと (b) CIE (1931 年) 色度座標を示しました。通常の赤、青、緑などの単色系 LED であれば、スペクトルには、一つの発光バンドしか観察されないはずですが、マルチファセット LED では、複数の発光バンドが同時に存在する多色発光をしていることがわかります。顕微鏡で確認したところ、*A* および *B* の (11 $\bar{2}2$ ) 面 LED から青色、*B* の (0001) 面 LED から黄色、*A* の (0001) 面 LED から赤色発光していることがわかりました。これらの加色混和の結果、いずれの LED も外部から見たときには白色発光しており、しかも、図 5 (b) に示したように、色度座標上では黒体輻射の軌跡上の白色となっていました。従来の単色系 LED を同じ色度座標上にプロットすると、それらは馬蹄形の周辺部に位置するのですが、マルチファセット LED の発光は、窒化物半導体だけで（蛍光体を使うことなく）白色を発し、馬蹄形の中心部分に位置することが大きな特徴です。色温度は、(i) が 4000 K, (ii) 6000 K, (iii) 15000 K であり、通常の蛍光灯の色温度の範囲である 3000 K から 6500 K や、従来の白色 LED の典型値 5500 K をほぼカバーすることができます。また図 5 (b) には、色温度 5000 K で光っている白色マルチファセット LED の写真を示しました。

研究の途中で、このマルチファセット LED の発光色は、駆動する電流値によって変化することがわかってきました。原因は、各ファセットの電気的特性に違いにより、電流値によって、優先的に電流が流れるファセットが代わるためです。この特性は、発光色の安定性という観点からすれば欠点ですが、一方で、これを積極的に利用すれば、電流値による発光色制御、つまり、外部からの発光色制御が可能になることを示唆しています。ただし、電流値を増加すると、通常、発光強度も増加しますので、発光強度を一定に保つために、電流を間欠的に供給するパルス駆動とし、電流値が増すに従い、電流パルスの幅を小さくする必要があります。図 6 に *A*:*B* = 2:1 のマルチファセット白色 LED を、パルス電流で駆動したときの色変化を示しました。5 mA で色温度 4000 K であり、電流を増加させると、ほ

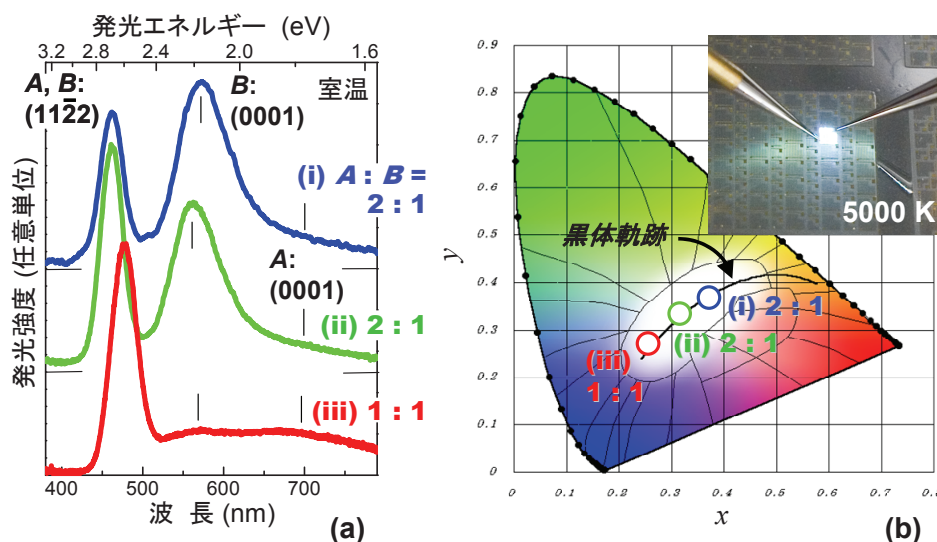


図 5 微細構造を用いたマルチファセット白色 LED の (a) EL スペクトルと (b) CIE (1931 年) 色度座標上へのプロット。再成長に使用するマスクのパターンや成長条件を調整することにより異なる色温度の白色が得られている。(b) の内挿図は 5000 K で発光する LED の写真である。

ほぼ黒体輻射の軌跡に沿って発光色が変化していることが見て取れます。

ここでは、白色LEDだけを紹介しましたが、同じ手法により、例えば淡い青色などのパステル調の発光を得ることも成功し、さらに、この発光色の電流値による制御にも成功しています。このように、新しい構造のLEDを、新しい駆動方式により発光させることにより、従来にないいくつかの機能、(1) スペクトルの外部調光、(2) 蛍光体を用いない白色・多色発光を実現することができたことを強調しておきたいと思います。

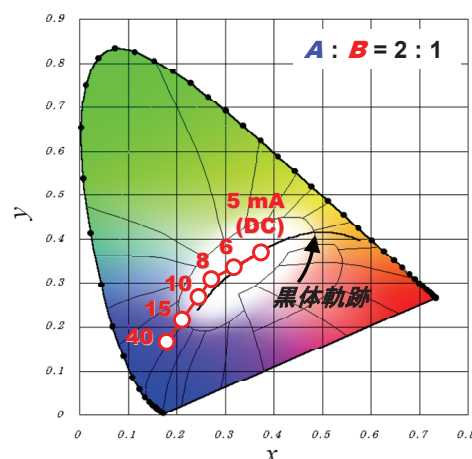


図6 パルス駆動したマルチファセット白色LED (A:B = 2:1) からの発光色変化の色度座標上へのプロット。

### その他の研究課題について

上記のLEDの開発過程において、 $\{11\bar{2}2\}$  面上のInGaN量子井戸における発光の確率が、従来用いられている(0001) 面上の量子井戸よりも桁違いに高いこともわかってきました。つまり、高い発光効率を実現するポテンシャルを持っていることを意味しています。このような物性を理解するには、基礎的な光物性評価が重要であり、私たちの研究室では、時間・空間分解した発光機構の解明を行っています。時間的には、10 ps (ピコ秒 =  $10^{-12}$  秒) のスケールで、電子と正孔が再結合して発光する様子(ダイナミクス)を捉える技術を蓄積してきました。さらに、近接場光学顕微鏡と呼ばれる、光学顕微鏡の空間分解能(数百 nm)よりも小さな空間分解能(数十 nm)を持った顕微鏡を研究室独自で開発しています。

また、この $\{11\bar{2}2\}$  面InGaN量子井戸の高い発光確率を利用したLEDの実証実験も行い、新聞などでも報道されています。

さらに最近では、発光波長の短波長化を目指し、AlGaInという別の材料系の開発と物性評価も行っています。発光波長は、250nm 前後であり、殺菌、消毒、微細加工、表面改質などの応用が考えられる深紫外域に位置しています。現在のところ、この波長域の光源は、例えば水銀ランプなど有害な物質を利用しているため、その置き換えが期待されています。結晶成長法の開発の結果、世界最高レベルの結晶品質が実現され、それによる高効率発光も観測されています。

今回は、これらのテーマの詳細を述べることはできませんでしたが、研究の一部は、研究室のホームページ [5] にも掲載されていますし、また、CUE でも別の機会に紹介できればと思います。

### まとめにかえて

光材料物性研究室では、以上のように、究極の光源「テラーメイド光源」の開発を目指し、材料開発と物性評価を、いわば車の両輪として研究を進めています。これは、新しい機能の創出には材料開発が必須であり、材料開発の原動力には、その物性解明が必須であると信じているからです。自分たちがアイデアを暖め、苦勞して成長・作製した光材料・デバイスから、どのような光が放出されるのかを観測・測定することは、大変心ときめくことです。この感動を味わうために、研究室のメンバーは日々研究に励んでいます。そのような努力の結果として、半導体による照明光源が飛躍的に発展し、地球環境の維持に貢献することができれば、私たちの大きな喜びです。

### 参考文献

[1] 白熱ランプの発明は、エジソンではなく、ジョゼフ・スワン (1828-1914) によるものです。

ここでは敢えて「事業化」と書きました.

- [2] <http://www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/NIGHTLIGHTS.html>
- [3] 白熱ランプや蛍光灯の国内における年間生産・販売統計は日本電球工業会の HP, <http://www.jelma.or.jp> に開示されていて, まだ相当数の白熱ランプが用いられていることが分かります.
- [4] ここでの発光効率<sup>1</sup>は, 投入した電力に対して, 人間の眼がどれだけの光を感じることができるのか, という指標で, lm (ルーメン) /W という単位で記述されます.
- [5] 研究室ホームページ: <http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>